

引用格式:张馨仁,王瑛,刘天雪,陈宇. 山洪灾害建筑物脆弱性曲线研究进展[J]. 山地学报,2021,39(3):356-366.

ZHANG Xinren, WANG Ying, LIU Tianxue, CHEN Yu. Research progress of building vulnerability curve associated with mountain torrent [J]. Mountain Research, 2021, 39(3):356-366.

山洪灾害建筑物脆弱性曲线研究进展

张馨仁^{a, b}, 王瑛^{a, b*}, 刘天雪^{a, b}, 陈宇^{a, b}

(北京师范大学 a. 环境演变与自然灾害教育部重点实验室; b. 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 山洪灾害会给受灾区带来巨大的人员伤亡和经济损失。房屋脆弱性分析是山洪风险研究的关键部分,而现有山洪灾害建筑物脆弱性曲线研究在数据来源、脆弱性量化、指标选择和曲线精度等方面仍缺少规范和标准。因此,本研究分别从脆弱性曲线的建立方法和多种致灾强度指标两个角度进行总结,为山洪脆弱性研究前景和中国山洪灾害防治提供参考。主要结论如下:(1)脆弱性曲线数据通常采用灾情调查数据、模型或实验模拟数据,也可以根据已有曲线进行本地化改进,或者提前调查房屋及内部财产高度的系统调查法。(2)致灾强度指标包括水深、流速、冲击压力、沉积深度等,其中水深和沉积深度脆弱性曲线研究相对较多。脆弱性相对一致的是砖混结构类建筑,100% 损毁的致灾强度大约为:流速 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冲击压力 44.5 kPa ,沉积深度 3 m 。(3)各类建筑结构的脆弱性排序为:木框架结构 > 砖混结构 > 钢混结构。通过对研究现状和存在问题的分析,以及不同结构类型房屋损失状况的归纳,本研究认为未来山洪建筑物脆弱性曲线研究可以开展多源数据、多技术、多曲线的集成和共享,中国在修建山区建筑时应多借鉴其他国家经验,增强房屋的抗洪能力。

关键词: 山洪灾害;脆弱性曲线;建筑物结构类型;致灾强度;灾害保险

中图分类号: X43

文献标志码: A

世界各地每年因山洪造成数十亿美元的经济损失和数千人的死亡^[1],山洪灾害在高强度持续性暴雨作用下发生,具有突发性、多发性、破坏力强等特点^[2],已成为造成人员伤亡的主要自然灾害类型^[3-4]。山洪可造成财产损失、房屋倒塌以及生命线工程中断等,其中房屋的破坏是造成直接损失的最主要因素^[5-6]。脆弱性分析是紧密联系灾害与风险研究的重要桥梁^[7-8],因此房屋脆弱性分析是山洪风险研究的关键组成。

在已有的脆弱性分析方法中,脆弱性曲线是精细定量评估承灾体损失的方法^[9],广泛应用于山洪

灾害建筑物脆弱性评估。经过数十年发展,山洪建筑物脆弱性曲线研究已有较多积累。学者们以单场历史山洪事件为背景评估建筑物的脆弱性^[10-12],或者为某一区域多场山洪灾害事件中的受损房屋建立脆弱性曲线^[13-15],研究结果受区域特性的限制,推广应用困难。据历史资料和文献调查显示,一定山洪强度下,房屋结构、高度、材料等的不同,导致其抵御山洪的能力也不同^[6,16-18]。砖混结构是中国山区农村运用最为广泛的房屋结构类型,其次为砖木,再次为钢混和其他结构,不同结构类型的房屋脆弱性有高低差异^[6]。因此,在山洪房屋脆弱性分析中

收稿日期(Received date):2020-09-01;改回日期(Accepted date):2021-05-26

基金项目(Foundation item):国家重点研发计划支持项目(2017YFC1502505)。^[National Key Research and Development Program of China (2017YFC1502505)]

作者简介(Biography):张馨仁(1997-),女,甘肃张掖人,博士研究生,主要研究方向:山洪灾害风险评估。^{[ZHANG Xinren(1997-),female, born in Zhangye, Gansu province, Ph. D. candidate, research on flash flood disaster risk assessment] E-mail:zxr@mail.bnu.edu.cn}

* 通讯作者(Corresponding author):王瑛(1974-),女,博士,教授,主要研究方向:自然灾害风险评估。^{[WANG Ying(1974-),female, Ph. D., professor, research on natural disaster risk assessment] E-mail:wy@bnu.edu.cn}

区分建筑结构是必要的做法。已有研究^[19]针对三种主要类型的建筑,即木质结构、砖混结构、钢混结构,并考虑建筑的功能用途和高度,分别建立了脆弱性曲线,然而现有研究在数据来源、脆弱性量化、指标选择、曲线精度等方面仍缺少相应规范和标准,不利于山洪建筑物脆弱性曲线的发展和迁移应用。此外,当前山洪灾害脆弱性研究在我国依然较为缺少,其难点在于我国的山洪灾害保险尚未开展,且山洪灾害建筑物的损失数据相对缺乏,加之山洪灾害的暴涨暴落的特点,使得山洪灾害各种致灾强度数据难以获取。基于上述研究不足和难点,本文从国内外山洪脆弱性曲线的建立方法、多种致灾强度指标曲线两个方面综述国内外研究现状,归纳不同结构类型房屋的灾害损失状况,以期为脆弱性曲线研究前景和中国山洪灾害防治提供参考。

1 脆弱性曲线

联合国 ISDR 将风险定义为由自然或人为因素导致的致灾因子和脆弱性之间的关系,表现为导致损害结果的可能性或人口伤亡、财产损失和经济波动的期望损失,用风险(R) = 致灾因子(H) × 脆弱性(V)表示^[8,20]。风险评估主要包括灾害危险性分析、承灾体脆弱性分析、灾害损失评估三个部分^[21]。脆弱性可以分解为人暴露在危险中程度的不同和应对能力的差异^[22],最终表现为承灾体面对灾害时的潜在损失^[23]。因此,脆弱性研究是风险分析的基础。

脆弱性评估目前主要有三种方法:脆弱性矩阵法、脆弱性指标法以及脆弱性曲线法^[24-27]。其中,脆弱性曲线表达了致灾因子强度与承灾体脆弱性的定量关系,是精细定量的脆弱性评估方法。脆弱性曲线(Vulnerability Curve)创始于1964年^[9],又叫脆弱性函数或灾损(率)函数(曲线)(Damage/Loss Curve),衡量不同致灾因子的强度与相应损失(率)之间的关系,以表格或曲线、曲面为表达形式^[28]。美国联邦保险机构(Federal Insurance Agency, FIA)制定的《国家洪水保险法》(the National Flood Insurance Act, 1968)中首次将脆弱性曲线应用于建筑物的损失评估中,展示了每增加一英尺水深,不同类型建筑的损失情况^[29]。

对近20年国内外山洪灾害建筑物脆弱性曲线

研究文献进行收集和整理,其相关信息见表1。总体上,研究涉及的历史灾害事件多集中于欧洲阿尔卑斯山区,受地理环境和社会经济因素影响,其区域特色突出,建筑物类型多样,脆弱性曲线差别明显。

2 建筑物的脆弱性

在山洪灾害中,建筑物的脆弱性定义为损失程度,即损失越大,房屋脆弱性越高^[37]。受社会公共基础、灾区可达性及区域差异影响,建筑物损失数据获取途径多元,且类型、标准和精度不一。大部分研究中建筑物损失记录来自于地方政府或机构提供的灾情数据和官方损失评估报告;在保险制度完善的国家和地区,可从保险公司的索赔清单获取损失信息;一些研究中使用的损失数据是通过实地调查及遥感解译得到的;此外还可根据记录损坏建筑的照片文档^[14],估计每栋建筑的经济损失,但这需要较为完整的建筑物影像资料记录。

目前山洪建筑物损失量化的方法一般分四类:一是建筑物损失价值的绝对值;二是建筑物损失价值相对于重建价值的比率;三是建筑物损失价值相对于原始价值的比率;四是建筑物不同损坏程度相对应的脆弱性值(0~1)。建筑物重建价值一般根据其面积(或体积)和每平方米(或每立方米)的平均价格计算,并且会根据建筑的功能用途、高度及建筑材料等采用不同的价格水平^[11,14-15,30]。AKBAS 和 QUAN LUNA 等人使用由米兰工程师和建筑师提供的房价指数相关数据,根据建筑物功能和大小计算重建值^[12,31];灾害保险制度完善的区域,可基于建筑物的大小,结合保险公司和房地产商提供的价格数据计算其重建值^[13,24,26]。建筑物的原始价值主要来源于统计局和建筑物数据库^[10,33],根据建筑物所处位置和功能(如城镇中心和郊区住宅、商业和工业建筑)确定平均市场价格,计算不动产价值。多数脆弱性曲线只考虑建筑物结构,但 LO 等人在为台湾泥石流灾害中损失的建筑构建脆弱性曲线时,将结构价值和内部财产(如家具、家庭设施)相结合估算其原始价值和损失价值^[32]。对建筑物损坏程度进行划分,一般为完全损坏,重度损坏,中度损坏及轻度损坏四个等级,并计算每种程度对应的脆弱性值^[34-35]。

表 1 山洪建筑物脆弱性曲线研究案例相关信息概述

Tab. 1 Cases of building vulnerability curves associated with mountain torrent							
研究文献	区域	灾害事件	数据来源	建筑类型	建筑数目	强度指标	脆弱性量化方法
DE LOTTO P, TESTA G. 2000 [10]	意大利	1994 - 11 Alpine Valley	统计局资料、GIS 分析、模型模拟	不同城市建筑 (住宅、商业等)	—	水深 (二维模型) 流速 (二维模型)	建筑物损失/原始价值
FUCHS S, HEISS K, JOHANNES HuBL. 2007 [11]	奥地利	1997 - 08 - 16 Wartschenbach	政府等机构提供的信息	典型高山区风格砖/石结构	16	沉积高度	货币损失/重建价值
AKBAS S O, BLAHUT J, STERLACCHINI S. 2009 [12]	意大利	2008 - 07 - 13 Selvetta	官方发布的损失评估报告	单层到三层砖混结构	13	沉积高度	货币损失/重建价值 (工程师和建筑师编制的房价指数)
TSAO T C, HSU W K, CHENG C T, et al. 2010 [30]	中国台湾省	2007 年前 20 个历史灾害事件	政府和建筑协会提供的信息、灾害的野外调查	砖混、木质框架结构	—	沉积高度	货币损失/重建价值
QUAN LUNA B, BLAHUT J, VAN WESTEN C J, et al. 2011 [31]	意大利	2008 - 07 - 13 Selvetta	官方发布的损失评估报告	单层到三层砖混结构	13	沉积高度 (FLO - 2D) 冲击压力 (FLO - 2D) 运动粘度 (FLO - 2D)	货币损失/重建价值 (工程师和建筑师编制的房价指数)
TOTSCHNIG R, SEDLACEK W, FUCHS S. 2011 [26] TOTSCHNIG R, FUCHS S. 2013 [13]	奥地利	1995 - 08 - 06, 1997 - 08 - 16 Wartschenbach, 2003 - 08 - 29 Vorderbergerbach, 2005 - 08 - 22 Fimbabach, Stubenbach, Schannernbach	地方政府提供的信息、GIS 插值信息	典型高山区风格砖/石结构民居、旅游设施	67	沉积高度 相对强度	货币损失/重建价值 (奥地利建筑保险公司)
LO W C, TSAO T C, HSU C H. 2012 [32]	中国台湾省	2009 年莫拉克台风 35 个灾害事件	政府统计资料、损失程度估计	单层砖混、单层钢筋混凝土	—	沉积高度	损失重建总费用 (结构价值 + 内部财产)/原始价值 (结构价值 + 内部财产)
PAPATHOMA - KÖHLE M, TOTSCHNIG R, KEILER M, et al. 2012 [24]	意大利	1987 - 08 - 24 Plimbabach	灾害的实地调查和摄影记录	典型高山区风格砖/石结构	51	沉积高度	货币损失/重建价值 (保险公司和房地产商)
董姝娜, 姜彦鹏, 张继权, 等. 2012 [33]	中国吉林省	2010 - 07 - 28 永吉县口前镇	实地调查、遥感解译、GIS 分析	村镇砖木结构平房	109	水深 (GIS 反演)	灾后损失价值/灾前原始价值
PAPATHOMA - KÖHLE M, ZISCHG A, FUCHS S, et al. 2015 [14]	意大利、奥地利	多次灾害事件	灾害的实地调查和照片记录	典型高山区风格砖/石结构	271	沉积高度	货币损失/重建价值
GODFREY A, CIUREAN R L, VAN WEATEN C J, et al. 2015 [34]	罗马尼亚	脆弱性指标与已有脆弱性曲线重建	野外调查、遥感数据、专家判断	多数木质砖混、少数钢筋混凝土	60	沉积高度	脆弱性指数 (VI)
KANG H, KIM Y. 2016 [35]	韩国	2011 年 7—8 月 11 次灾害事件	实地调查、地形图、航空照片	钢混、非钢混结构	25	沉积高度 冲击压力	建筑物破坏程度相对应的脆弱性值
KARAGIORGOS K, THALER T, HuBL J, et al. 2016 [15]	希腊	Attica 地区多次灾害事件	损失评估报告、保险公司索赔	钢混结构	114	水深 相对强度	货币损失/重建价值
ZHANG J, GUO Z X, WANG D, et al. 2016 [36]	中国	设计实验	实验数据	砖混结构	—	动量 (流能) 最大冲击力 最大冲击弯矩	四类损坏程度： 轻微、轻度、中度和严重损坏 (或倒塌)
CIUREAN R L, HUSSIN H, WESTEN C V, et al. 2017 [19]	意大利	2003 - 08 - 29 Fella Valley	航空照片、损坏建筑照片文档、官方损失报告	砖混/木结构	721	沉积深度	损失重建费用/原始价值

3 建筑物脆弱性曲线的建立

3.1 基于灾情数据

灾情包括人员伤亡及造成的心理影响、直接经济损失和间接经济损失、建筑物破坏、生态环境及资源破坏等^[38]。灾情数据主要来源于政府的灾害损失评估报告、实地调查、保险公司索赔数据及历史文献记载。由于大规模灾害调查和灾损信息核实工作的任务重、难度大,因此在国外灾害损失数据收集过程中,政府机构与保险公司共同参与,一手数据主要来源于保险公司的索赔清单。与加拿大^[39]、澳大利亚^[40-41]、日本^[42]等保险市场发展成熟的国家相比,中国的自然灾害保险制度尚不健全,因此主要参考政府发布的损失评估报告及灾区实地调研结果。理论上,基于灾情数据构建的脆弱性曲线能够很好地反映山洪灾害建筑物的脆弱性水平,但在实际研究中,灾情还受设防水平、灾害预警等多种因素影响,因此并不能准确刻画建筑物的真实脆弱性。损失的准确估算取决于被淹没建筑物的数量和建筑物在被淹没地区的使用情况^[43],因此,灾情数据的准确性和完整度对脆弱性曲线精度有较大程度的影响。此外,研究者主观地选择不同的数学方法描述脆弱性曲线,如线性回归^[10]、非线性回归分析^[33]、概率累积分布函数拟合等^[26]也会对脆弱性曲线构建产生一些影响^[44]。

3.2 对已有脆弱性曲线的完善

在已有建筑物脆弱性曲线的基础上,考虑区域差异性,对脆弱性曲线的参数进行本地化修正,得到适用于该区域新的脆弱性曲线。一种是基于相同的山洪事件两次构建灾损曲线,第二次构建是对第一次构建的脆弱性曲线进行修正^[13,26];另一种则选取和本地背景相似区域的已有脆弱性曲线^[24]结合本地损失数据进行再构建^[12],如 GODFREY 等人将已有研究中的泥石流脆弱性曲线与一组指标的脆弱性指数相结合,得到研究区域新的脆弱性曲线^[34]。脆弱性曲线的重构建可以减少工作量,但只适用于具有相似特征的区域和建筑类型,且受主观因素影响较大,曲线精度有待验证和改进。

3.3 基于系统调查法

系统调查法是指基于承灾体数据库/价值调查,在假设的灾害情景中,对不同承灾体分类并估计其

致灾强度下的损失率,进而构建脆弱性曲线^[29]。在山洪灾害中,该方法基于区域统计数据、土地利用方式、建筑物数据库和调查问卷等,将不同致灾强度下的损失率对应起来,建立脆弱性曲线。以台湾山洪事件调查为例^[32],梳理系统调查法的步骤为:(1)对建筑物及内部财产分类登记;(2)依据类型、材质和使用时间,估算价值;(3)根据建筑物及财产放置在地面的平均高度,假设不同的淹没深度情景,并估算损失;(4)建立建筑物结构及内部财产损失的脆弱性曲线。灾害事件相关的淹没深度和家庭损失无记录时,借助系统调查法判断不同淹没深度下建筑物及内部财产损失,可解决数据缺失的问题。因此,对于那些灾害数据不完备的区域,系统调查法的优势显见。但该方法也存在局限:仅有英国等少数具有相对完善的建筑物数据库的国家和地区可以使用^[45];建筑物价值调查因工作量大,只适用于小范围区域且淹没情景假设的合理性决定了脆弱性曲线的精度。

3.4 基于模型或实验模拟

由于数学模型和计算机技术的迅速发展,基于降水、地形位置等信息,通过数值模拟来刻画山洪灾害的致灾过程,或在实验室设计模拟实验,也可完成脆弱性曲线的构建。最为常见的方法是基于分布式水文模型(如 HEC-HMS、MOBIDIC)和水动力学模型(一维、二维、三维)的数值模拟软件(如 FLO-2D)来模拟山洪灾害的过程,并输出淹没深度、流速、运动粘度等强度指标^[31,46],可用于脆弱性曲线的构建。中国学者在实验室设计科学实验,使用铁球等材料来模拟泥石流冲击砖混结构承重墙体的过程,并记录相关的实验数据,将动量、最大冲击力和最大冲击弯矩作为致灾强度指标建立脆弱性曲线^[36]。基于模型模拟构建脆弱性曲线受到较少的研究限制,随着实验数据的积累,脆弱性曲线的精度也会随之提高。在处理数据时,因运算量较大,技术要求高,因此,仍然需要实际灾情数据的检验和修正来保证其可靠性。在实验室中设计科学实验可以更好地理解致灾机理,但对实验装置及操作过程处理要求很严格。

4 不同致灾强度指标脆弱性曲线

自然灾害的威胁一般通过损失表现出来,越高

的致灾强度导致越高的损失,这一公认理论是脆弱性曲线发展的基础,它表达了致灾强度和损失程度之间的关系^[47]。在山洪灾害建筑物脆弱性曲线研究中,会采用水深、沉积深度(泥石流/河流泥沙)、流速、冲击压力等致灾强度指标,也有研究借鉴海啸危险性评估参数,使用流体力学中的动量通量概念(反映水深和流速的综合指标,即给定点处水深和最大流速平方的乘积)指标^[48],从不同角度量化山洪致灾强度与建筑物损失程度的关系。

在同一致灾强度指标下,不同结构类型的建筑物的损失率存在着差异。为方便进行比较和归纳,将收集的山洪建筑物脆弱性曲线(表1)按致灾强度指标分类,设计致灾强度采用绝对值,在充分考虑各脆弱性曲线的损失量化方法,把不同致灾强度水平下的损失统一相对于完好建筑物的损失程度(0~100%),并表示在同一坐标系内。

4.1 水深

图1a所示的脆弱性曲线是以希腊^[15]和阿尔卑斯山区^[10]为背景建立的水深—损失程度脆弱性曲线。当水深达到12 m时,阿尔卑斯山区建筑损失率接近100%,而希腊则不到40%,因此,以希腊为代表的地中海沿岸国家建筑物脆弱性程度远低于阿尔卑斯山区,这与其他研究结果^[11,13,49]相一致,究其原因如下:(1)希腊建筑遵循严格的抗震规范建设^[50];(2)地理环境及建筑使用习惯不同。希腊因气候温暖建筑内无供暖设施,且该研究区域内房屋主要在夏季使用,降低了灾害的暴露度。此外,与有地下室的房屋相比,无地下室房屋更容易受到破坏。这是因为当地绝大多数无地下室房屋没有加固地

基,而有地下室房屋做了地基加固。

中国农村山区典型砖木结构平房的脆弱性曲线结果显示^[33](图1b),研究根据砖木结构住宅的修建年代及外表装饰材料将其进一步划分为三类(类别1:建造于20世纪80年代,墙体无照面和装饰材料;类别2:20世纪90年代兴建,墙壁上半部用石子装饰,下部有围子;类别3:近期兴建,墙壁用瓷砖装饰),图中红色实线表示三类房屋损失随水深变化的平均状况。当水深大于1 m时,各类砖木结构房屋存在不同程度的损坏,且在同一淹没水深下,使用年限越长的房屋其损失率越大。

比较上述脆弱性曲线发现,不同结构类型建筑的损失率有如下特征:在3 m水深下,中国农村山区砖木结构房屋损失率达到90%以上,阿尔卑斯山区典型的砖/石结构1~3层建筑损失率在70%左右,而以希腊为代表遵循抗震规范建设的钢混结构建筑损失率则不到20%。全球各个国家和地区的建筑结构区别明显,因此,在同一致灾强度水平下表现出不同的受损程度,随之脆弱性曲线也存在差异。

4.2 流速和冲击压力

KANG等基于2011年7—8月韩国境内的山洪事件,建立了当地建筑物的流速—损失程度脆弱性曲线^[35],如图2所示,钢混结构和非钢混结构建筑由于结构强度不同,抗洪能力也不同。随着流速的增加,非钢混结构与钢混结构建筑的损失差异增大。非钢混建筑完全损坏时的流速为 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而钢混结构则为 $9.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。非钢混结构建筑的损失率随着流速的增大而增大,比钢混结构增长得更快。导致钢混结构房屋轻微损坏的流速可以使非钢混结

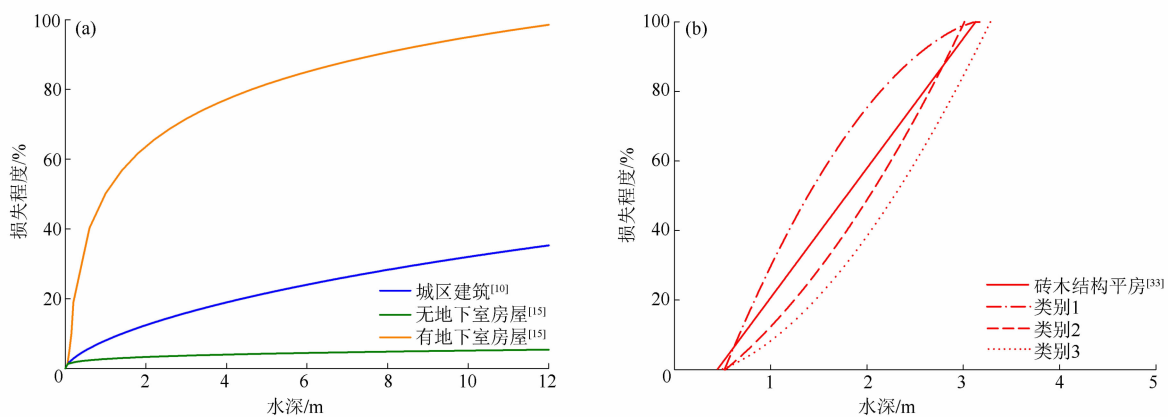


图1 水深—损失程度脆弱性曲线:(a)阿尔卑斯山区建筑;(b)中国吉林山区建筑

Fig. 1 Building vulnerability curve of water depth versus damage level: (a) buildings in Alps; (b) buildings in rural areas of Jilin, China

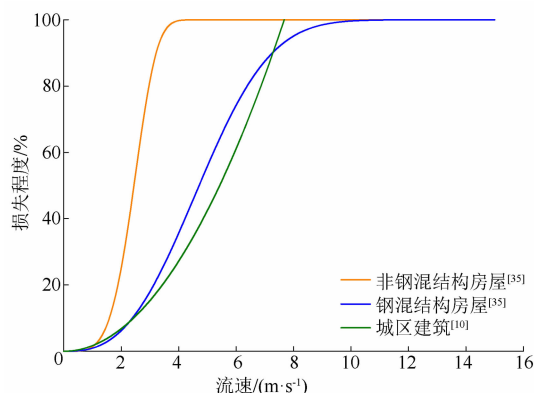


图2 流速-损失程度脆弱性曲线

Fig. 2 Building vulnerability curve of flow velocity versus loss damage level

构完全损毁。意大利城区建筑物脆弱性曲线^[10] (绿色曲线)与韩国钢混结构房屋脆弱性曲线具有很好的相似性,相同流速下损失程度仅相差4%左右,这表明阿尔卑斯山区城镇建筑房屋的结构可能以钢混结构类型为主。

QUAN LUNA 等基于 FLO-2D 软件模拟了意大利北部阿尔卑斯山谷 Selvetta 村在强降雨过后爆发的山洪灾害过程及淹没范围,并得到冲击压力等物理参数,建立了脆弱性曲线^[31];韩国山洪事件同样使用了冲击压力这一强度指标得到了建筑物的脆弱性曲线^[35] (图3)。阿尔卑斯山区砖混结构房屋脆弱性与韩国非钢混结构房屋的脆弱性很相似,约在 21.5 kPa 冲击压力下达到相同的损失,说明这两类房屋结构的抗洪能力相当。在韩国山洪灾害事件中,随着冲击压力的增大,非钢混结构与钢混结构房屋的脆弱性迅速拉开差距,使非钢混结构房屋完全

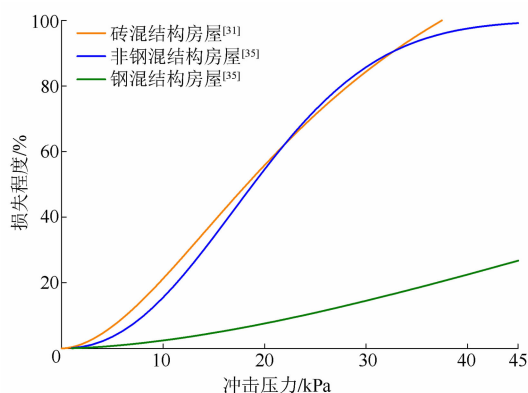


图3 冲击压力-损失程度脆弱性曲线

Fig. 3 Building vulnerability curve of impact force versus damage level

损毁,只需要 44.5 kPa 的冲击压力,而钢混结构房屋则需要约 5 倍(222 kPa)的冲击压力。

非钢混结构指除钢混结构以外的类型,如砖混、砖木结构等。上述流速和水深的建筑物脆弱性曲线均表明:钢混结构房屋的抗洪能力最强,非钢混结构的房屋脆弱性明显低于钢混结构,房屋结构和质量的改造对减轻山洪灾害有重要的作用。

4.3 沉积深度

山洪与泥石流通常相伴而生,因此沉积深度-损失程度脆弱性曲线的研究也相对较多(图4)。如图4a所示,FUCHS 等人采用二阶多项式函数拟合了砖/石结构房屋的脆弱性曲线^[11],由于该研究中泥石流的强度较小,所以 < 2.5 m 致灾强度下的建筑脆弱性符合二阶多项式拟合结果。继该研究后,AKBAS 等采用相同的方法基于阿尔卑斯山区 Selvetta 村山洪事件建立了砖混结构房屋的脆弱性曲线^[12]。TOTSCHNIG 等^[26]人在 2011 年给出了泥石流和山区洪水总体的脆弱性曲线,在 2013 年又扩展了研究区域的数据,对之前的研究进行修正,另外还考虑了曲线不确定性的量化,并提出了一个联合脆弱性函数,表征民居、旅游设施的建筑物脆弱性曲线^[13]。PAPATHOMA-KÖHLE 等人^[24]参考 TOTSCHNIG 的做法,在阿尔卑斯山区开发了典型砖石结构房屋的脆弱性曲线。

由于降水、地形等自然条件影响,台湾是山洪泥石流多发地区,对该地区不同结构类型建筑物的脆弱性曲线开展研究^[30,32] (图4b)。可以看到,木框架结构房屋脆弱性最高,砖混结构房屋脆弱性次之,钢混结构房屋最低。当地房屋损失率有以下特点:木框架结构的房屋在 1.5 m 沉积深度下就会完全损毁;砖混结构房屋在 3~3.4 m 完全损毁;当沉积深度 > 2 m 时,钢混结构相对砖混结构而言,抗洪能力更强,损失程度相对更轻,但在 3.43 m 时,两种建筑的损失率均达到 100%。当沉积深度大于建筑物高度的一半时,两种结构类型的房屋可能会被完全破坏^[51]。

总体而言,建筑物结构的脆弱性排序为:木框架结构 > 砖混结构 > 钢混结构。此外,CIUREAN 等人针对同一场灾害事件中木质结构、砖混结构、钢混结构的不同高度的建筑物分别建立了沉积深度的脆弱性曲线^[19],研究结果表明,无论何种结构类型的建筑,层数越高时,其脆弱性越低,即同结构类型建筑

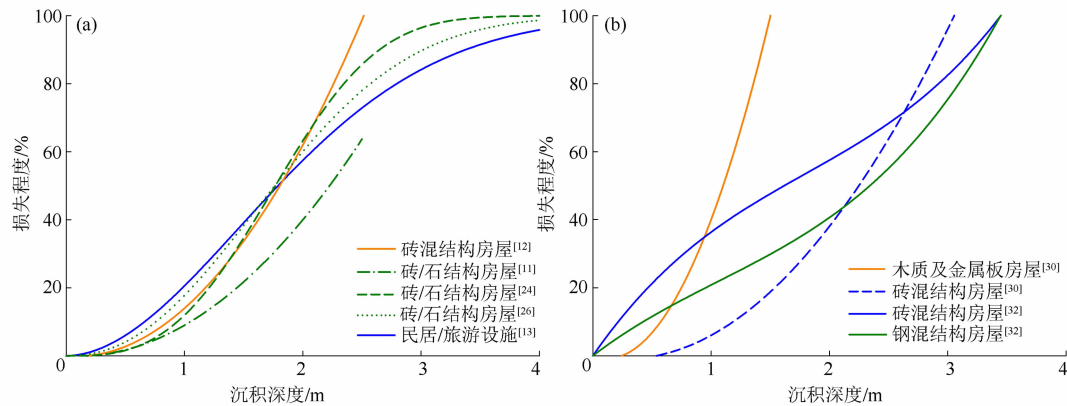


图 4 沉积深度 - 损失程度脆弱性曲线:(a)阿尔卑斯山区建筑;(b)中国台湾山区建筑

Fig. 4 Building vulnerability curve of deposition depth versus damage level: (a) buildings in Alps; (b) buildings in rural areas of Taiwan, China

物内部的脆弱性也有差异,且与建筑物高度有很大关系。

5 结论与讨论

本研究从脆弱性曲线的建立方法和多种致灾强度指标两个角度总结了山洪灾害建筑物脆弱性曲线国内外研究现状,归纳了不同结构类型房屋的灾害损失,主要结论如下:

(1)脆弱性曲线的构建通常基于灾情调查数据、模型或实验模拟数据,也可以根据已有曲线进行本地化改进,或者提前调查房屋及内部财产高度的系统调查法来构建脆弱性曲线。使用灾情数据构建脆弱性曲线是基本的方法,数据精度影响着损失的准确估计;脆弱性曲线的重构建可以减少工作量,验证区域的可用性是关键;系统调查法与模型或实验模拟可间接得到致灾强度和损失的大致信息,为一些缺少完备灾损数据区域建筑物的损失估计提供可能。

(2)从致灾强度指标看,构建山洪灾害脆弱性曲线的指标有水深、流速、冲击压力、沉积深度等,其中水深和沉积深度脆弱性曲线研究相对较多。各国研究较多、脆弱性相对一致的是砖混结构建筑,100%损毁的致灾强度大约为:流速 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冲击压力 44.5 kPa ,沉积深度 3 m 。目前的脆弱性曲线研究从多角度的致灾强度指标去刻画山洪建筑物的损失,这是全面理解山洪致灾过程的开始,现阶段仅从单一因素构建脆弱性曲线简化了程序,但同时也模糊了多指标因素之间的相互作用及对建筑物造

成损伤的综合过程。因此,随着山洪致灾机理研究的深入,通过开发综合性的致灾强度指标用于脆弱性曲线的构建,能够更好地刻画建筑物的损失状况。

(3)各类建筑结构的脆弱性排序为:木框架结构 > 砖混结构 > 钢混结构。在 3 m 水深下,中国农村山区广泛分布的砖木结构房屋损失达到 90% 以上,意大利阿尔卑斯山区典型的砖/石结构 1~3 层建筑损失在 70% 左右,而以希腊为代表的地中海沿岸国家遵循抗震规范建设的钢混结构建筑损失则不到 20%。造成上述差异的原因主要有两个:其一,在相同致灾强度水平下,不同类型建筑物结构损失率差异的产生与建筑物本身的物理结构有密切的关系,如承重结构、地基、建筑物高度、使用年限等^[52],这些性质决定了建筑物本身的抗洪能力;其二,在山洪暴发的影响下,建筑物处于复杂的弯曲剪切状态,倾覆力矩是造成建筑物损坏的主要原因,建筑物发生损坏是山洪洪流过程与建筑物共同作用的结果,其作用机制和损坏模式相当复杂^[53-54],需要进一步的综合深入研究。

目前,国内外山洪建筑物脆弱性曲线研究积累了一些成果和经验,并正在持续深入研究,但仍存在一些问题。在脆弱性量化、指标选择、数据标准、曲线精度等方面仍缺少规范和评价的标准,今后需对灾害数据库建设和脆弱性曲线研究及应用方面进行统筹。其次,国内灾害保险市场的完善、行业规范问题的解决,以及研究数据基础建设和发展是一个长期改进的过程。因此,未来山洪建筑物脆弱性曲线研究,可以开展多源数据、多技术、多曲线的集成和共享。由于社会经济条件的限制,中国目前的农村

山区建筑多为砖木结构房屋,抗洪能力较弱,脆弱性也高于欧洲其他国家。未来房屋建设应多借鉴其他国家经验,增强山区房屋的抗洪能力。

致谢:北京师范大学刘雨欣和西北师范大学陆玉莹同学参与了本文前期脆弱性曲线研究文献收集和整理工作,谨致谢忱!

参考文献 (References)

- [1] GOURLEY J J, FLAMIG Z L, VERGARA H, et al. The flash project: Improving the tools for flash flood monitoring and prediction across the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, **98**(2): 361 – 372. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00247.1
- [2] 谢平,陈广才,李德,等. 乌鲁木齐地区小流域设计山洪推理公式的参数规律[J]. *山地学报*, 2006, **24**(4): 410 – 415. [XIE Ping, CHEN Guangcai, LI De, et al. Study on the parameter laws of rational formula for design flash flood calculation of small basins in Urumchi region [J]. *Mountain Research*, 2006, **24**(4): 410 – 415] DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2006.04.004
- [3] 刘志雨. 山洪预警预报技术研究与应用[J]. *中国防汛抗旱*, 2012, **22**(2): 41 – 45 + 50. [LIU Zhiyu. Study and application of flash flood forecast and warning [J]. *China Flood and Drought Management*, 2012, **22**(2): 41 – 45 + 50] DOI: 10.16867/j.cnki.cfdm.2012.02.014
- [4] 熊俊楠,龚颖,程维明,等. 西藏自治区近 30 年山洪灾害时空分布特征[J]. *山地学报*, 2018, **36**(4): 557 – 570. [XIONG Junnan, GONG Ying, CHENG Weiming, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of mountain floods in Tibet, China in recent 30 years [J]. *Mountain Research*, 2018, **36**(4): 557 – 570] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000352
- [5] 魏一鸣,范英,金菊良. 洪水灾害风险分析的系统理论[J]. *管理科学学报*, 2001, **4**(2): 7 – 11 + 44. [WEI Yiming, FAN Ying, JIN Juliang. System theory for risk analysis of flood disaster [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2001, **4**(2): 7 – 11 + 44] DOI: 10.3321/j.issn:1007-9807.2001.02.002
- [6] 王楠,程维明,张一驰,等. 全国山洪灾害防治县房屋损毁风险评估及原因探究[J]. *地球信息科学学报*, 2017, **19**(12): 1575 – 1583. [WANG Nan, CHENG Weiming, ZHANG Yichi, et al. Reasons and risk assessment of housing damage in the national mountain torrent disaster prevention county [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, **19**(12): 1575 – 1583] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.01575
- [7] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. *自然灾害学报*, 2005, **14**(6): 1 – 7. [SHI Peijun. Theory and practice on disaster system research in a fourth time [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2005, **14**(6): 1 – 7] DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2005.06.001
- [8] 周瑶,王静爱. 自然灾害脆弱性曲线研究进展[J]. *地球科学进展*, 2012, **27**(4): 435 – 442. [ZHOU Yao, WANG Jingai. A review on development of vulnerability curve of natural disaster [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(4): 435 – 442]
- [9] CROWLEY J M, WHITE G F. Choice of adjustment to floods. University of Chicago, Department of Geography Research Paper No. 93. Chicago, 1964. 150 pages, notes bibliographiques infrapaginales, appendice par John E. Edinger [J]. *Cahiers de Géographie du Québec*, 1964, **9**(17): 121 – 122. DOI: 10.7202/020547ar
- [10] DE LOTTO P, TESTA G. Risk assessment: A simplified approach of flood damage evaluation with the use of GIS [G]// *Proceedings of Internationales Symposion Interpraevent 2000-Villach* (Austria)/Osterreich, Italy, 2000, **2**: 281 – 291.
- [11] FUCHS S, HEISS K, HÜBL J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, **7**(5): 495 – 506. DOI: 10.5194/nhess-7-495-2007
- [12] AKBAS S O, BLAHUT J, STERLACCHINI S. Critical assessment of existing physical vulnerability estimation approaches for debris flows [G]//MALET J P, REMAÎTRE A, BOGAARD T. *Proceedings of Landslide Processes: From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modeling*, CERG Editions, Strasbourg, France, 2009, **67**: 229 – 233.
- [13] TOTSCHNIG R, FUCHS S. Mountain torrents: Quantifying vulnerability and assessing uncertainties [J]. *Engineering Geology*, 2013, **155**(2): 31 – 44. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.12.019
- [14] PAPATHOMA-KÖHLE M, ZISCHG A, FUCHS S, et al. Loss estimation for landslides in mountain areas: An integrated toolbox for vulnerability assessment and damage documentation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, **63**(1): 156 – 169. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.10.003
- [15] KARAGIORGOS K, THALER T, HÜBL J, et al. Multi-vulnerability analysis for flash flood risk management [J]. *Natural Hazards*, 2016, **82**(1): 1 – 25. DOI: 10.1007/s11069-016-2296-y
- [16] 李亚娥,司应石,徐忠浩,等. 山洪作用对砌体结构倒塌破坏的分析[J]. *低温建筑技术*, 2013, **35**(9): 51 – 54. [LI Yae, SI Yingshi, XU Zhonghao, et al. Under the action of mountain torrents on the analysis of the masonry structural collapse destroyed [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2013, **35**(9): 51 – 54] DOI: 10.3969/j.issn.1001-6864.2013.09.021
- [17] 吴敏,吴政鹏,余日华,等. 洪涝灾害对砌体建筑承载能力的影响研究[J]. *江苏建筑*, 2016(S1): 16 – 19 + 32. [WU Min, WU Zhengpeng, YU Rihua, et al. Study on the influence of flood disaster on the bearing capacity of masonry building [J]. *Jiangsu Construction*, 2016(S1): 16 – 19 + 32] DOI: 10.3969/j.issn.1005-6270.2016.z1.006
- [18] 李卫江,温家洪,吴燕娟. 基于 PGIS 的社区洪涝灾害概率风险

- 评估——以福建省泰宁县城为例[J]. 地理研究, 2014, **33** (1): 31–42. [LI Weijiang, WEN Jiahong, WU Yanjuan. PGIS-based probabilistic community flood disaster risk assessment: A case of Taining County town, Fujian province [J]. Geographical Research, 2014, **33** (1): 31–42] DOI: 10.11821/dlyj201401004
- [19] CIUREAN R L, HUSSIN H, VAN WESTEN C J, et al. Multi-scale debris flow vulnerability assessment and direct loss estimation of buildings in the Eastern Italian Alps [J]. Natural Hazards, 2017, **85**(2): 929–957. DOI: 10.1007/s11069–016–2612–6
- [20] UN/ISDR. Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives 2004 version [Z]. United Nations Publication, 2004, 6.
- [21] 周成虎, 万庆, 黄诗峰, 等. 基于 GIS 的洪水灾害风险区划研究 [J]. 地理学报, 2000, **55**(1): 15–24. [ZHOU Chenghu, WAN Qing, HUANG Shifeng, et al. Research on GIS-based flood disaster risk zoning [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, **55**(1): 15–24]
- [22] CHAMBERS R. Editorial introduction: Vulnerability, coping and policy [J]. Institute of Development Studies Bulletin, 1989, **20** (2): 1–7. DOI: 10.1111/j.1759–5436.1989.mp20002001.x
- [23] CUTTER S L, BORUFF B J, SHIRLEY W L. Social vulnerability to environmental hazards [J]. Social Science Quarterly, 2003, **84** (2): 242–261. DOI: 10.1111/1540–6237.8402002
- [24] PAPATHOMA-KÖHLE M, TOTSCHNIG R, KEILER M, et al. A new vulnerability function for debris flow: The importance of physical vulnerability assessment in alpine areas [G]// Proceedings of 12th Congress Interpraevent 2012. Grenoble, 2012: 1033–1043.
- [25] BIRKMANN J, CARDONA O D, CARREÑO M L, et al. Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework [J]. Natural Hazards, 2013, **67**(2): 193–211. DOI: 10.1007/s11069–013–0558–5
- [26] TOTSCHNIG R, SEDLACEK W, FUCHS S. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport [J]. Natural Hazards, 2011, **58**(2): 681–703. DOI: 10.1007/s11069–010–9623–5
- [27] 吉中会, 吴先华. 山洪灾害风险评估的研究进展[J]. 灾害学, 2018, **33**(1): 162–167 + 174. [JI Zhonghui, WU Xianhua. A review about the risk assessment of torrential flood disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2018, **33**(1): 162–167 + 174] DOI: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.01.029
- [28] SHI Peijun, KASPERSON R, WANG Jing'ai, et al. World atlas of natural disaster risk [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2015: 309–323. DOI: 10.1007/978–3–662–45430–5_17
- [29] SMITH D I. Flood damage estimation: A review of urban stage-damage curves and loss functions [J]. Water South Africa, 1994, **20**(3): 231–238. DOI: 10.1029/94WR00710
- [30] TSAO T C, HSU W K, CHENG C T, et al. A preliminary study of debris flow risk estimation and management in Taiwan [G] // Proceedings of International Symposium Interpraevent in the Pacific Rim-Taipei. 2010: 930–939.
- [31] QUAN LUNA B, BLAHUT J, VAN WESTEN C J, et al. The application of numerical debris flow modeling for the generation of physical vulnerability curves [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, **11**(7): 2047–2060. DOI: 10.5194/nhess–11–2047–2011
- [32] LO W C, TSAO T C, HSU C H. Building vulnerability to debris flows in Taiwan: A preliminary study [J]. Natural Hazards, 2012, **64**(3): 2107–2128. DOI: 10.1007/s11069–012–0124–6
- [33] 董姝娜, 姜懿鹏, 张继权, 等. 基于“3S”技术的村镇住宅洪灾脆弱性曲线研究[J]. 灾害学, 2012, **27**(2): 34–38 + 42. [DONG Shuna, JIANG Liupeng, ZHANG Jiquan, et al. Research on flood vulnerability curves of rural dwellings based on “3S” technology [J]. Journal of Catastrophology, 2012, **27**(2): 34–38 + 42]
- [34] GODFREY A, CIUREAN R L, VAN WEATEN C J, et al. Assessing vulnerability of buildings to hydro-meteorological hazards using an expert based approach: An application in Nehoiu Valley, Romania [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2015, **13**: 229–241. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2015.06.001
- [35] KANG H, KIM Y. The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events [J]. Natural Hazards, 2016, **80**(3): 1475–1493. DOI: 10.1007/s11069–015–2032–z
- [36] ZHANG J, GUO Z X, WANG D, et al. The quantitative estimation of the vulnerability of brick and concrete wall impacted by an experimental boulder [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2016, **16**(2): 299–309. DOI: 10.5194/nhess–16–299–2016
- [37] UNDRO. Natural disasters and vulnerability analysis [R]. Department of Humanitarian Affairs/United Nations Disaster Relief Office, Geneva, 1979: 53.
- [38] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, **11**(3): 1–9. [SHI Peijun. Theory on disaster science and disaster dynamics [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, **11** (3): 1–9] DOI: 10.13577/j.jnd.2002.0301
- [39] DEGAGNÉ M P J, MACMILLAN D B. Red river basin stage-damage curves update and preparation of flood damage maps [G] // American Society of Civil Engineers, KGS Group. Proceedings of Joint Conference on Water Resources Engineering and Planning & Management, Canada; International Joint Commission Mixte Internationale, 2000: 1–15.
- [40] HOHL R, SCHIESSER H, ALLER D. Hailfall: The relationship between radar-derived hail kinetic energy and hail damage to buildings [J]. Atmospheric Research, 2002, **63**(3–4): 177–207. DOI: 10.1016/S0169–8095(02)00059–5

- [41] HOHL R, SCHIESSER H, KNEPPER I. The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: An exploratory study in Switzerland [J]. *Atmospheric Research*, 2002, **61**(3):215 – 238. DOI: 10.1016/S0169-8095(01)00134-X
- [42] DUTTA D, HERATH S, MUSIAKE K. A mathematical model for flood loss estimation [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **277**(1 – 2):24 – 49. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00084-2
- [43] MERZ B, KREIBICH H, THIKKEN A, et al. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2004, **4**:153 – 163. DOI: 10.5194/nhess-4-153-2004
- [44] DE MOEL H, AERTS J C J H. Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates [J]. *Natural Hazards*, 2011, **58**(1):407 – 425. DOI: 10.1007/s11069-010-9675-6
- [45] PENNING-ROUSELL E C, CHATTERTON J B. The benefits of flood alleviation: A manual of assessment techniques [J]. *The Geographical Journal*, 1979, **145**(3):472 – 473. DOI: 10.2307/633221
- [46] ARRIGHI C, MAZZANTI B, PISTONE F, et al. Empirical flash flood vulnerability functions for residential buildings [J]. *SN Applied Sciences*, 2020, **2**(5):904. DOI: 10.1007/s42452-020-2696-1
- [47] HARTFORD D, FELL R. Landslide risk assessment [G]//CRUDEN D and FELL R. *Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment*, New York: Taylor and Francis Group, 1997:51 – 110. DOI: 10.1201/9780203749524
- [48] PRIETO J A, JOURNEY M, ACEVEDO A B, et al. Development of structural debris flow fragility curves (debris flow buildings resistance) using momentum flux rate as a hazard parameter [J]. *Engineering Geology*, 2018, **239**(1):144 – 157. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.03.014
- [49] APEL H, ARONICA G T, KREIBICH H, et al. Flood risk analyses—how detailed do we need to be? [J]. *Natural Hazards*, 2009, **49**(1):79 – 98. DOI:10.1007/s11069-008-9277-8
- [50] SARRIS A, LOUPASAKIS C, SOUPIO P, et al. Earthquake vulnerability and seismic risk assessment of urban areas in high seismic regions: Application to Chania City, Crete Island, Greece [J]. *Natural Hazards*, 2010, **54**(2):395 – 412. DOI: 10.1007/s11069-009-9475-z
- [51] ZHANG S, ZHANG L, LI X, et al. Physical vulnerability models for assessing building damage by debris flows [J]. *Engineering Geology*, 2018, **247**:145 – 158. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.017
- [52] ZHOU J, LI S, NIE G, et al. Research on seismic vulnerability of buildings and seismic disaster risk: A case study in Yancheng, China [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, **45**(3):101477. DOI: 10.1016/j.ijdr.2020.101477
- [53] LUO H Y, FAN R L, WANG H J, et al. Physics of building vulnerability to debris flows, floods and earth flows [J]. *Engineering Geology*, 2020, **271**(12):105611. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105611
- [54] JALAYER F, ARONICA G T, RECUPERO A, et al. Debris flow damage incurred to buildings: An in situ back analysis [J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2016, **11**(2):646 – 662. DOI: 10.1111/jfr3.12238

Research Progress of Building Vulnerability Curve Associated with Mountain Torrent

ZHANG Xinren^{a,b}, WANG Ying^{a,b*}, LIU Tianxue^{a,b}, CHEN Yu^{a,b}

(*a. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education;*

b. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Mountain torrent disaster is one of the main type of geohazards causing casualties in China. Damages in constructions inflicted by torrential floods not only directly threatens people's lives and properties downstream, but also is an essential component of economic losses. As a key data-dependent approach to accurately quantify the assessment of disaster risk, a vulnerability curve introduced a quantitative relationship between the intensity of a disaster process and the vulnerability of relevant disaster-bearing bodies (such as personnel, property, infrastructure, etc.). In this study, the research progress of building vulnerability curve associated with mountain torrent was summarized from two perspectives: (1) the methods to determine vulnerability curve, and (2) indexes

of disaster-prone intensity, so as to provide reference for the new direction of development and the prevention of mountain torrent disaster in China. The conclusions are as follows: (1) As to the data sources of a vulnerability curve, it generally originated from field survey, modelling or laboratory works, and localized improvement on existing curves could also be applicable, or an early investigation could be comprehensively conducted on the height of damaged buildings as well as the indoor properties. (2) The indexes of disaster-prone intensity referred water depth, flow velocity, impact pressure, sediment depth, etc., among which more research attentions were paid to water depth and sediment depth for creating a vulnerability curve. A brick-concrete structure, regardless of its location in case of suffering a 100% damage, must be under a specific damage-causing intensity as reference to $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in flow rate, 44.5 kPa in impact pressure and 3 m in sediment depth. (3) As per strength indexes, the vulnerability of all kinds of building structures followed the following order: wood frame structure > brick-concrete structure > steel-concrete structure. There are great discrepancy among countries in producing building vulnerability curves associated with mountain torrent. In the case of 3 m in water depth, the loss rate for brick-wood structure houses in rural areas of China was over 90%, whereas in Italy it was only about 70% for typical alpine masonry structure houses. In Greece, a Mediterranean country, the loss rate of reinforced concrete buildings to be built strictly according to seismic codes was less than 20%. In addition, for buildings with the same structural type, the longer the service life, the greater the vulnerability were, and low buildings were more susceptible to damage. In future research on building vulnerability curve associated with mountain torrent, multi-source data, multi-technology and multi-curve are supposed to be integrated and shared. Lessons from the flood-relief experiences of other countries should be learned for enhancement of flood resistance of mountain buildings of China.

Key words: mountain torrent disaster; vulnerability curve; types of building structure; hazard intensity; disaster insurance